

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

RAFAEL GOMES NOBREGA PAIVA

**ANÁLISES COMPARATIVAS DE ERRO DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DE ESTUDOS
GR&R CRUZADO E EXPANDIDO**

JOÃO PESSOA

2018

RAFAEL GOMES NOBREGA PAIVA

**ANÁLISES COMPARATIVAS DE ERRO DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DE ESTUDOS
GR&R CRUZADO E EXPANDIDO**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

JOÃO PESSOA

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catálogo e Classificação

P142a Paiva, Rafael Gomes Nobrega.

Análises comparativas de erro de medição através de estudos GR&R cruzado e expandido / Rafael Gomes Nobrega Paiva. - João Pessoa, 2018.
52 f.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Análise de Sistema de Medição. 2. Repetitividade. 3. Reprodutividade. 4. GR&R cruzado. 5. GR&R expandido. I. Título

UFPB/BC

RAFAEL GOMES NOBREGA PAIVA



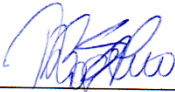
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

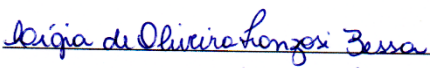
FOLHA DE APROVAÇÃO


Aluno(a): Rafael Gomes Nobrega Paiva

Título do trabalho: Análises comparativas de erro de medição através de estudos GR&R cruzado e expandido

Trabalho de Conclusão do Curso defendido e aprovado em 29/10/2018 pela banca examinadora:


Orientador(a) - Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi


Examinador(a) interno - Prof. Dr. Lígia de Oliveira Franzosi Bessa


Examinador(a) interno - Prof. Dr. Paulo Botelho Júnior

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a Jesus Cristo e ao meu anjo da guarda, por todo cuidado e proteção.

Devo gratidão aos meus pais, a minha mãe que desde de pequeno me ajuda nos estudos e mostra o quanto eles são importantes para o meu caráter e crescimento e ao meu pai que é exemplo de um estudioso e curioso sobre as coisas do mundo e da alma.

À toda a minha família, em especial minha avó Maria da Penha, por ser um exemplo de mulher e mãe para todos nós.

À minha namorada e companheira, Lavínia Maria, que esteve comigo em toda essa jornada, me apoiando, me incentivando, corrigindo e me orientando na escrita deste presente trabalho. Muito obrigado por tudo, te amo.

Ao meu orientador, pela paciência e compreensão, pelo apoio pleno e dedicação ao nos passar um pouco do seu conhecimento.

A todos os meus amigos, que de forma direta ou indireta, contribuíram nesses anos de universidade, cada trabalho, cada conversa faz parte da construção de quem eu sou hoje e tem sua parcela de participação nesta conquista.

A todos os professores, por cada ensinamento.

E a todos os servidores da universidade, por cada auxílio e ajuda.

RESUMO

Na busca pela qualidade de um processo de fabricação, é necessário controlar e avaliar uma causa de variação inevitável, o erro de medição. O estudo de Repetitividade e Reprodutividade (Gage Repeatability and Reproducibility – GR&R) é o mais usado para os componentes de variação em análise do sistema de medição (MSA). Esta pesquisa visa comparar o GR&R cruzado e o GR&R expandido a partir de suas estimativas dos índices de classificação do sistema de medição, neste contexto, o primeiro se limita a estimar a variação do processo de fabricação apenas pela diferença entre as peças, já o segundo pode estimar essa variação de forma mais eficiente usando mais fatores em um modelo de análise de variância. Esta comparação foi realizada em um experimento de soldagem de revestimento, analisando cinco cenários, cada um com uma característica crítica da qualidade (CTQ), sendo três unidimensionais, o Reforço, a Penetração e a Largura do cordão e duas bidimensionais, a Área de Penetração e a Área Total. As contribuições são apontar, no contexto desse experimento, qual é o melhor arranjo experimental para a classificação do sistema de medição e qual é o mais eficiente para diagnosticar os erros de reprodutividade e repetitividade. De acordo com as análises estatísticas e dos gráficos, evidencia-se que o GR&R expandido com interações é mais eficiente e completo do que o GR&R expandido sem interações e o GR&R cruzado.

Palavras chave: Análise de Sistema de Medição, Repetitividade, Reprodutividade, GR&R cruzado, GR&R expandido.

ABSTRACT

In the quest for the quality of a manufacturing process, it is necessary to control and evaluate a unavoidable source of variation, the measurement error. The Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R) studies is most commonly used for sources of variation into the Measurement System Analysis (MSA). The aim of this research is to compare the GR&R crossed and the GR&R expanded from their estimation of the indexes of classification of the measurement system, the first is limited to estimate the variation of the manufacturing process only by the difference between the pieces, the second is more efficiently using more factors in a variance analysis model. This comparison was performed in a coating welding experiment by analyzing five cases, each with one critical-to-quality (CTQ), three one-dimensional, the high reinforcement, the penetration and Width of weld bead and two two-dimensional, the Penetration Area and the Total Area. The contributions are to point out in the context of this experiment what is the best experimental arrangement for the classification of the measurement system and which is the most efficient to diagnose reproducibility and repeatability errors. According to the statistical and graphical analyzes, it is evident that the GR&R expanded with interactions is more efficient and complete than the GR&R expanded without interactions and the GR&R crossed.

Key-words: Measurement System Analysis, Repeatability, Reproducibility, GR&R crossed, GR&R expanded.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do sistema de medição.....	18
Figura 2 - Fluxograma da análise estatística. Fonte: Elaborado pelos autores.....	20
Figura 3 - CTQs unidimensionais - Reforço (R), Penetração (P), Largura de cordão (W)	22
Figura 4 - Área de Penetração.	22
Figura 5 - Área Total.	22
Figura 6 - Médias dos efeitos principais.....	42
Figura 7 - Médias Geral dos Operadores por Ferramenta	42
Figura 8 - Gráfico de Interação entre Operador e Peça	43
Figura 9 - RChart em análise expandida.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Reforço (R).....	24
Tabela 2 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Penetração (P)..	24
Tabela 3 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Largura do cordão (W).....	25
Tabela 4 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Área de Penetração (Pa).....	25
Tabela 5 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Área Total (Ta)	26
Tabela 6 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Reforço (R).....	27
Tabela 7 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Penetração (P).....	27
Tabela 8 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Largura do cordão (W)	28
Tabela 9 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Área de Penetração (Pa)	29
Tabela 10 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Área Total (Ta)	29
Tabela 11 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Reforço (R).....	30
Tabela 12 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Penetração (P).....	31
Tabela 13 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Largura do cordão (W)	31
Tabela 14 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Área de Penetração	32
Tabela 15 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Área Total	33
Tabela 16 - Tabela resumo dos cenários de análise.....	34
Tabela 17 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Reforço (R)	35
Tabela 18 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Penetração (P).....	35
Tabela 19 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Largura do cordão (W)	36
Tabela 20 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação - CTQ: Área de Penetração (Pa)	36
Tabela 21 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação - CTQ: Área Total (Ta).....	37
Tabela 22 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Reforço (R)	38
Tabela 23 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Penetração (P)	39
Tabela 24 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Largura do cordão (W)	39

Tabela 25 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Área de Penetração (Pa).....	40
Tabela 26 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Área Total (Ta)	41

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANOVA	Método Análise de Variância
CTQ	Característica Crítica da Qualidade (<i>critical-to-quality</i>)
DOE	<i>Design of Experiments</i>
GR&R	Estudo de Repetitividade e Reprodutividade do Instrumento de Medição (<i>Gage Repeatability and Reproducibility</i>)
MSA	Análise do sistema de medição (<i>Measurement System Analysis</i>)
R&R	Repetitividade e Reprodutividade (<i>Repeatability and Reproducibility</i>)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Definição do Tema.....	13
1.2. Justificativa	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Estrutura do Trabalho	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Estudo de repetitividade e reprodutividade (GR&R).....	15
2.2. GR&R cruzado.....	16
2.3. GR&R expandido.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1. Procedimento experimental e de medição	21
4.2. Análise do sistema de medição	23
4.2.1. Estudo de GR&R cruzado	23
4.2.1.1. Características Críticas da Qualidade Unidimensionais	23
4.2.1.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais	25
4.2.2. Estudo de GR&R expandido sem interação	26
4.2.2.1. Características Críticas da Qualidade Unidimensionais	26
4.2.2.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais	28
4.2.3. Estudo de GR&R expandido com interação.....	29
4.2.3.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais	32
4.3. Comparação das Análises	33
4.3.1. Comparação entre GR&R expandido com interações com GR&R expandido sem interação.....	34
4.3.1.1. Características Críticas da Qualidade unidimensionais.....	34
4.3.1.2. Características Críticas da Qualidade bidimensionais.....	36
4.3.2. Comparação entre GR&R expandido com interações com GR&R cruzado	38
4.3.2.1. Características Críticas da Qualidade unidimensionais.....	38
4.3.2.2. Características Críticas da Qualidade bidimensionais.....	40
4.4. Análises Gráficas	41
5. CONCLUSÕES.....	44
Apêndice	45
Referências	51

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão desenvolvidas as considerações iniciais do estudo, primeiramente com a definição do tema, a posteriori a justificativa do mesmo, serão expostos os objetivos, tanto geral, quanto específicos e por fim a estrutura do trabalho.

1.1. Definição do Tema

Em projetos de melhoria da qualidade são utilizadas técnicas de controle para diminuir o número de defeitos (SENOL, 2004). Os estudos que envolvem o “erro zero” nos processos de fabricação estão focados em reduzir variabilidade. Quando o processo não é capaz, ações de melhoria devem ser implementadas. No entanto, é possível que a capacidade do processo seja boa, mas as medições dos produtos não. Isto é, a variação das medições σ_{sm}^2 é significativa diante da variação do processo σ_p^2 . Assim, esforços de melhoria apenas no processo não serão suficientes para reduzir variabilidade. Por isso, os projetos de qualidade, devem focar também em análise do sistema de medição (AIAG, 2010; AL-REFAIE; BATA, 2010; PEREIRA *et al.*, 2016; PERUCHI, *et al.*, 2014; PERUCHI, *et al.*, 2013).

Os erros apresentados nas medições podem ser sistemáticos ou aleatórios. O erro sistemático consiste na diferença entre a média observada das medições em relação à um valor de referência (AIAG, 2010). Já o erro aleatório pode ocorrer devido à repetitividade, isto é, à variação de um mesmo operador medindo a mesma peça repetidas vezes. Ou à reprodutividade, cuja variação é dada pela diferença das medições entre diferentes operadores (AWAD *et al.*, 2009; WANG; CHIEN, 2010).

O estudo de Repetitividade e Reprodutividade (GR&R) é utilizado para medir os componentes de variação em análise do sistema de medição (MSA) (AIAG, 2010). Dentre os modelos que o GR&R pode ser executado, têm-se o (1) cruzado e o (2) expandido. Em (1) são envolvidos dois componentes de entrada, sendo um de processo e um de medição. Já em (2) é possível inserir mais entradas na análise e acrescentar interações no modelo. Percebe-se, então, que para realizar um estudo de GR&R deve-se saber qual modelo é o mais adequado para avaliar um determinado sistema de medição. Dado isso, a questão problema que a presente monografia propõe-se a responder é: “Qual arranjo de GR&R possui melhor desempenho nos resultados da análise do sistema de medição em um experimento de soldagem de revestimento?”

1.2. Justificativa

Na indústria, mensurar a variabilidade do produto e do processo é uma tarefa complexa. Caracterizá-la em um estudo de qualidade apenas a partir da variação das peças pode simplificar uma análise que poderia ser mais completa. Portanto, para a variabilidade do processo de medição, pode haver a necessidade de acrescentar mais de um fator de entrada, como por exemplo, a utilização de mais de uma ferramenta para execução da medição (SENOL, 2004).

Uma importante premissa para conduzir a análise de sistemas de medição é selecionar peças que representem a amplitude real de variação do processo de fabricação. Tal requisito pode ser atendido usando técnicas de projeto de experimentos (*design of experiments* – DOE) para promover tal variação no processo de fabricação. O estudo GR&R cruzado é o mais utilizado para se avaliar o erro aleatório de sistemas de medição. Na literatura encontram-se diversos estudos que utilizaram o GR&R cruzado como método de análise (AL-REFAIE; BATA, 2010; ALSHRAIDEH *et al.*, 2016; CEPOVA *et al.*, 2018; DALALAH; DIABAT, 2015; HA *et al.*, 2017; LI; AL-REFAIE, 2008; PAN, 2006; PEREIRA *et al.*, 2016; PERUCHI *et al.*, 2014; PERUCHI *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2014; WANG; CHIEN, 2010; ZANOBINI *et al.*, 2016). No entanto, esta estratégia se limita a estimar a variação do processo de fabricação apenas pela diferença entre as peças.

Para um mesmo experimento, o estudo GR&R expandido pode ser capaz de estimar a variação do processo de fabricação de forma mais efetiva usando mais fatores em um modelo de análise de variância. Na literatura existem poucos estudos relacionados ao GR&R expandido, como o de Senol (2004) e o de Awad *et al.* (2009). O primeiro autor utilizou o planejamento de experimentos para acrescentar ao modelo de avaliação do sistema de medição o fator laboratório. O estudo concluiu que as condições ambientais e atmosféricas, que muitas vezes são desprezadas em estudos de GR&R cruzado, podem contribuir para a variabilidade das medições. Já o segundo autor fez o estudo com peças instáveis cuja análise pelo GR&R cruzado traria resultados distorcidos.

Comparar estes estudos possibilita a academia e as empresas possuírem mais embasamento na tomada de decisão de como avaliar o erro de medição no controle de qualidade do processo de fabricação. Além disso, um estudo teórico que traga benefícios as empresas aproximará os pesquisadores desta área as fábricas e aos gestores da qualidade.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desse estudo é comparar índices de classificação de sistemas de medição a partir dos estudos de GR&R cruzado, GR&R expandido sem interação e GR&R expandido com interações para um mesmo experimento.

O experimento consiste em um processo de soldagem de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. Foram selecionadas oito peças para serem medidas. Três operadores realizaram as medições. A geometria do cordão de revestimento foi avaliada por três respostas unidimensionais e duas bidimensionais. As unidimensionais são: o reforço, a penetração e a largura do cordão. As bidimensionais são: a área de penetração e a área total. As medições foram realizadas através do *software* analisador de imagem ImageJ®.

Para alcançar o objetivo geral, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um fluxograma que sequeencie a análise do sistema de medição;
- Classificar o sistema de medição de cada característica da qualidade a partir do GR&R cruzado;
- Classificar o sistema de medição de cada característica da qualidade a partir do GR&R expandido sem interação;
- Classificar o sistema de medição de cada característica da qualidade a partir do GR&R expandido com interação;
- Comparar os resultados dos gráficos de cada tipo de GR&R.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este estudo estrutura-se em cinco seções. A primeira é a presente introdução. A segunda apresenta a base teórica. A terceira refere-se à metodologia de pesquisa. A quarta à análise dos resultados. Finalmente, a quinta expõe os aspectos conclusivos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico será descrito o Estudo de repetitividade e reprodutividade (GR&R), serão explicados cada um desses erros, além da descrição do GR&R cruzado e do GR&R expandido. Também será exposto o índice de classificação do sistema de medição.

2.1. Estudo de repetitividade e reprodutividade (GR&R)

A análise do sistema de medição, a partir do GR&R, é uma importante ferramenta para os projetos de melhoria da qualidade. Por ela, é possível identificar se a variabilidade das

medições é influente ou não na variação total do processo (AL-REFAIE; BATA, 2010; SHI *et al.*, 2014). As principais fontes de variação do sistema de medição, de acordo com Burdick *et al.* (2005), podem ser: operadores, instrumento de medição, condições ambientais, dentre outras.

O GR&R aborda dois componentes principais quando da variação das medições: a Repetitividade e a Reprodutividade. Repetitividade é a variação das repetidas medições de uma peça sob as mesmas condições de medição. Refere-se ao o erro aleatório das medições e à variação dentro do sistema. Reprodutividade pode vir da variação das médias das medições feitas por diferentes operadores em uma mesma peça, ou seja, da interação peça e operador. Bem como, da variação das médias das medições por operador. Consiste, assim, na variação entre os sistemas de medição (AQUILA *et al.*, 2018; BURDICK, *et al.*, 2005; DALALAH; HANI, 2016; MARQUES *et al.*, 2018; PERUCHI, *et al.*, 2013; WANG; CHIEN, 2010; YU *et al.*, 2017). Os dois métodos mais utilizados na análise do GR&R são: análise de variância (ANOVA) e os gráficos X-bar e R. Em geral, a ANOVA é o método mais utilizado. Isto, porque consegue identificar o erro de medição da interação peça*operador (AIAG, 2010; WANG, FU-KWUN; CHIEN, 2010).

O modelo geral da ANOVA, em análise de sistema de medição, é dado na Eq. (1). Em que Y é o valor medido de uma peça aleatória de um determinado processo. X é a medida verdadeira da peça, e E é o erro de medição. X e E são variáveis aleatórias e independentes. Suas médias são representadas por μ_p e μ_{sm} , e variâncias por σ_p^2 e σ_{sm}^2 , respectivamente. É importante saber que os erros geralmente são eliminados pela calibração do sistema, assim, $\mu_{sm} \cong 0$ e consequentemente $\mu_Y = \mu_p$ (BURDICK, *et al.*, 2005; PERUCHI, *et al.*, 2014).

$$Y = X + E \quad (1)$$

2.2. GR&R cruzado

Em relação ao Estudo de Repetitividade e Reprodutividade (GR&R) cruzado, seu modelo é ilustrado na Equação (2) com dois fatores aleatórios cruzados e com interação. Este analisa uma única característica da qualidade “ y_{ijk} ”. Desta forma, “p” representa o número de peças, “o” o número de operadores; e “r” o número de réplicas. Além disso, μ é a média dos valores medidos, e α_i , β_j , $\alpha\beta_{ij}$ representam peça, operador, e o efeito da interação entre peça e operador, respectivamente. (BURDICK, *et al.* 2005; PERUCHI, *et al.*, 2014)

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (2)$$

A variação do sistema de medição ($\hat{\sigma}_{sm}^2$) pode ser estimada pela Eq. (3) (DOLEZAL, *et al.*, 1998; LI; AL-REFAIE, 2008). Os outros componentes de variância, como a do processo ($\hat{\sigma}_p^2$), de repetitividade ($\hat{\sigma}_{repetitividade}^2$), de reprodutividade ($\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2$) seguem nas Eq. (4), (5), (6) e (7). (BURDICK, *et al.*, 2005)

$$\hat{\sigma}_{sm}^2 = \hat{\sigma}_{repetitividade}^2 + \hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_p^2 = \hat{\sigma}_\alpha^2 \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_{repetitividade}^2 = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_{reprodutividade}^2 = \hat{\sigma}_\beta^2 + \hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2 \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = \hat{\sigma}_p^2 + \hat{\sigma}_{sm}^2 \quad (7)$$

Existem casos em que a ANOVA pode conter fatores fixos e aleatórios, sendo este modelo denominado “misto”. Se em uma análise do sistema de medição, os operadores não são retirados de uma população de operadores, isto é, as medições são feitas por todos os operadores, é apropriado tratá-los como efeitos fixos (DOLEZAL *et al.*, 1998). Logo, o modelo assumirá que β_j é um efeito fixo e $\sum \beta_j = 0$. Ainda, α_i , $\alpha\beta_{ij}$ e ε_{ijk} são fatores aleatórios (BURDICK *et al.*, 2005; DOLEZAL *et al.*, 1998; MONTGOMERY, 2013). Desta forma, a variância da reprodutividade será igual, apenas, a variância da interação entre peça e operador ($\hat{\sigma}_{\alpha\beta}^2$)




A aceitabilidade de um sistema de medição pode ser estimada em termos de desvio padrão ou variância. Neste artigo, esta será analisada em termos de variância. Sendo a razão entre a variância do sistema de medição e a variância total (Eq. (8)). (HA *et al.*, 2017; ZANOBINI *et al.*, 2016)

$$\% R \& R = \left(\frac{\hat{\sigma}_{sm}^2}{\hat{\sigma}_T^2} \right) 100 \quad (8)$$

Por conseguinte, se o índice %R&R for inferior a 1%, o sistema é considerado aceitável. Entre 1% e 9 %, é considerado marginal. Sendo assim, sua aceitação dependerá da aplicação, custo do reparo, entre outros fatores. Acima de 9% o sistema é considerado inaceitável, e deve

ser melhorado (HA *et al.*, 2017; ZANOBINI *et al.*, 2016). A Fig. 1 esquematiza estes parâmetros.

Figura 1 - Classificação do sistema de medição

	Inaceitável	$\%R\&R > 9\%$
	Marginal	$1\% < \%R\&R < 9\%$
	Aceitável	$\%R\&R < 1\%$

Fonte: Adaptado Ha *et al.* (2017); Zanobini *et al.* (2016)

2.3. GR&R expandido

É possível que em processos industriais sejam necessários mais de dois fatores, além de peças e operadores, para compor a análise do sistema de medição. Burdick *et al.* (2005) afirma que arranjos cruzados ou fatoriais podem ser expandidos para mais de dois fatores. Um modelo que inclui três fatores, por exemplo, está ilustrado na Eq. (9). O modelo consistirá na média geral das medições “ μ_Y ”, o efeito principal de todos os três fatores “ α_i ”, “ β_j ” e “ τ_k ”, assim como, as interações de segunda ordem “ $(\alpha\beta)_{ij}$ ”, “ $(\alpha\tau)_{ik}$ ” e “ $(\beta\tau)_{jk}$ ”, a interação de terceira ordem entre os três “ $(\alpha\beta\tau)_{ijk}$ ”, e o erro “ ε_{ijkl} ”. Para mais, “ i ”, “ j ”, “ k ” são os níveis de α , β e τ , respectivamente, e r é o nível das réplicas.

$$Y_{ijk} = \mu_Y + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\tau)_{ik} + (\beta\tau)_{jk} + (\alpha\beta\tau)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, t \\ l = 1, 2, \dots, r \end{array} \right. \quad (9)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

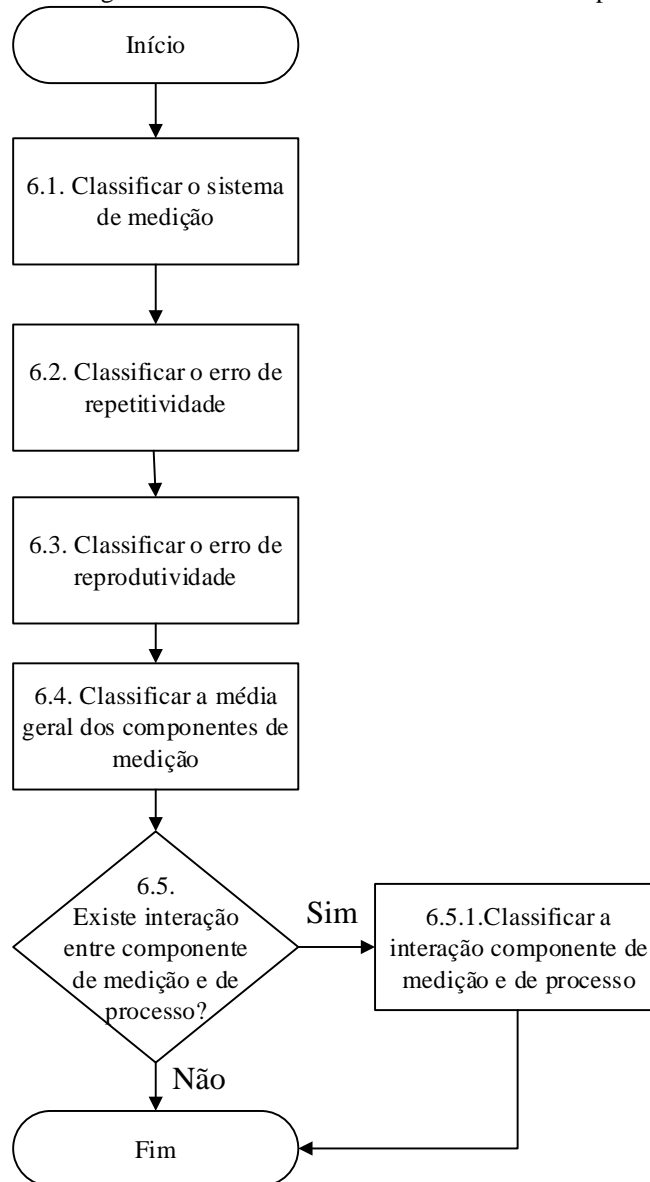
Esse trabalho tem uma abordagem quantitativa experimental. Destacasse que a pesquisa possui o foco no método de análise e assim o processo de fabricação é descrito de forma simplória. Sendo assim, o método de pesquisa utilizado baseia-se nos sete passos para Projeto e Análise de Experimentos, desenvolvidos por Montgomery (MONTGOMERY, 2013). As três primeiras etapas consistem em planejamentos pré experimento, enquanto as demais ocorrem após a realização do mesmo. O primeiro passo é explanado na Introdução. Os demais constam na seção de Resultados e Discussão. Os passos são os seguintes:

1. Definir o problema: definir o problema de um experimento nem sempre é uma tarefa simples. É importante apontar as ideias acerca do problema, assim como, o objetivo do experimento. Estas informações possibilitam um melhor entendimento e orientação acerca do processo, bem como, as eventuais soluções para o problema;
2. Selecionar Variáveis de Respostas: deve-se escolher variáveis que sejam relevantes para o processo em estudo. Por exemplo, especificações que os clientes almejam, requisitos de normas ou do próprio processo;
3. Escolher fatores e seus níveis: deve-se selecionar fatores para serem variados no experimento e determinar seus respectivos níveis. Geralmente, esses fatores são selecionados por conhecedores do processo e da teoria;
4. Escolher o arranjo experimental: se os três passos anteriores tiverem sido feitos corretamente, usualmente, esta etapa será realizada sem complicações. A escolha de um arranjo envolve consideração do número de réplicas, seleção adequada da ordem de execução, e outras restrições de randomização;
5. Executar o experimento: na execução do experimento sugere-se que o processo seja bem monitorado para saber se está ocorrendo conforme o que foi pré-estabelecido;
6. Análise estatística dos dados: métodos estatísticos devem ser utilizados para analisar os dados, para que assim, conclusões e recomendações possam ser dadas mediante o experimento. Nesta etapa, existem softwares e métodos gráficos que podem auxiliar. A análise estatística utilizada no presente estudo é o GR&R. Os parâmetros gerados serão classificados conforme os índices da Fig. 1. O passo-a-passo da análise para todos os tipos de GR&R é feito como segue no fluxograma da Fig. 2. No passo 6.1, deve-se classificar o sistema de medição. Já no passo 6.2, classifica-se o erro de repetitividade. No passo 6.3 é classificado o erro de reprodutividade. Em seguida, no passo 6.4, classifica-se as médias gerais dos componentes de medição. No passo 6.5, se não existir

interação entre os componentes de medição e os de processo, finaliza-se a análise. Se existir, no passo 6.5.1, classifica-se esta interação e dar-se fim ao estudo do GR&R;

7. Conclusões e recomendações: após a análise estatística, respostas práticas serão apresentadas para o problema uma vez apresentado.

Figura 2 - Fluxograma da análise estatística. Fonte: Elaborado pelos autores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, será descrito o procedimento experimental, bem como, a definição de soldagem de revestimento. Ainda, serão expostos os cenários e seus respectivos fatores de resposta. Serão descritas as variáveis de entrada, o arranjo experimental e os resultados do experimento. Estes últimos serão analisados estatisticamente de três formas. Por fim, as análises serão comparadas.

4.1. Procedimento experimental e de medição

Seguindo a metodologia, primeiramente o problema é definido como qual arranjo de GR&R possui melhor desempenho nos resultados da análise do sistema de medição em um experimento de soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, utilizando arame tubular. Este processamento pode ser definido como a deposição de uma camada de metal de adição, neste caso, o aço inoxidável, sobre a superfície de um metal base, o aço carbono, a fim de se obter propriedades anti-corrosivas.(SOWRIRAJAN *et al.*, 2018)

Seguindo o segundo passo da metodologia, as variáveis de respostas serão as cinco características críticas de qualidade (CTQ) diferente, cada uma caracterizando um cenário diferente. Das CTQs, três são unidimensionais: reforço (R), largura do cordão (W) e penetração (P); e duas bidimensionais: a área de penetração (Pa) e a área total (Ta).

No terceiro passo são determinados os parâmetros de entrada, têm-se 3 operadores treinados e capacitados, 8 peças e 2 ferramentas (utilizadas apenas nas medições das respostas bidimensionais). Para a análise do GR&R expandido, três parâmetros serão acrescidos: a velocidade de alimentação do arame (Va), a velocidade de soldagem (Vs) e a tensão (T). Vale salientar que para este caso as peças não serão mais parâmetros de entrada.

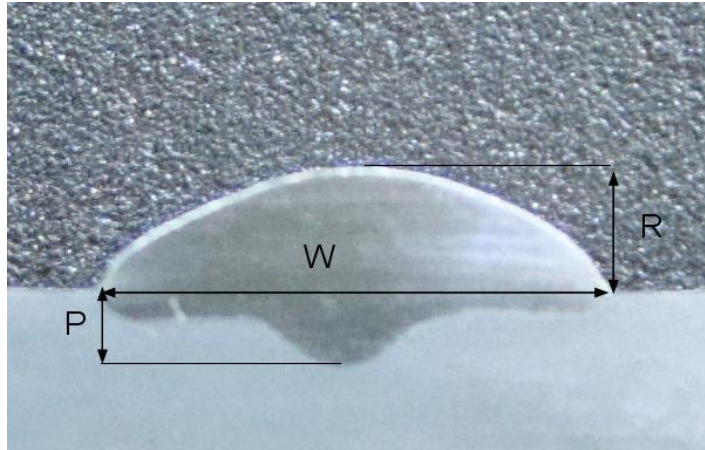
Já no quarto passo escolhe-se o arranjo experimental utilizado, que foi o Fatorial Geral Completo. Este é utilizado quando os parâmetros possuem diferentes níveis. Por exemplo, existem *a* níveis para o fator A, *b* níveis para o fator B, e *c* níveis para o fator C (MONTGOMERY, 2013). O arranjo resultou em um total de 72 medições incluindo 3 réplicas de cada peça para as respostas unidimensionais. E 144 medições, com 3 réplicas de cada peça para cada variável bidimensional.

Seguindo o quinto passo, as medições foram feitas com o auxílio do software analisador de imagens ImageJ®. Nele, utilizou-se duas ferramentas para a medição das respostas bidimensionais, “polígono” e “*freehand*”, a fim de avaliar se há influência no uso de alguma

destas no erro de medição. O resultado das medições é gerado em pixels, por isso, fez-se a conversão para milímetros através da Eq. (10), adaptada de Pereira *et al.*(2016). Onde, M_{mm} é o valor medido em milímetros, M_{pix} é o valor medido em pixels, R_{mm} é o valor referência, dado pela espessura do corpo de prova no valor de 6,35mm e R_{pix} é o valor da espessura do corpo de prova medido pelo software em pixels. As Fig. 3, 4 e 5 ilustram um cordão de solda destacando as suas CTQs unidimensionais (Reforço, Penetração e Largura do cordão), a Área de Penetração e a Área Total, respectivamente. As medições estão expostas no apêndice, as unidimensionais na Tabela A1 e as bidimensionais na Tabela A2.

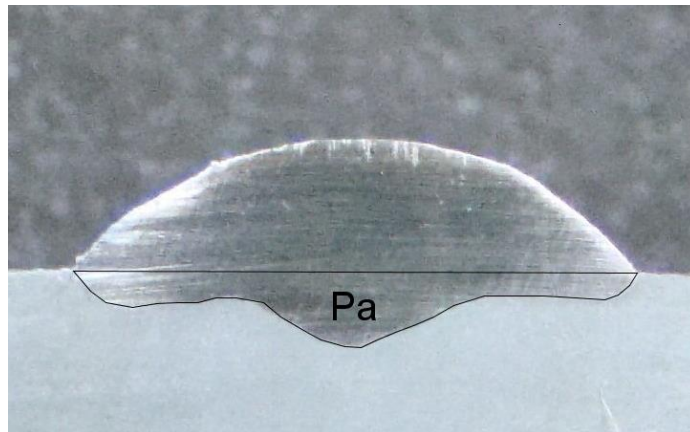
$$M_{mm} = \frac{M_{pix} \times R_{mm}}{R_{pix}} \quad (10)$$

Figura 3 - CTQs unidimensionais - Reforço (R), Penetração (P), Largura de cordão (W)



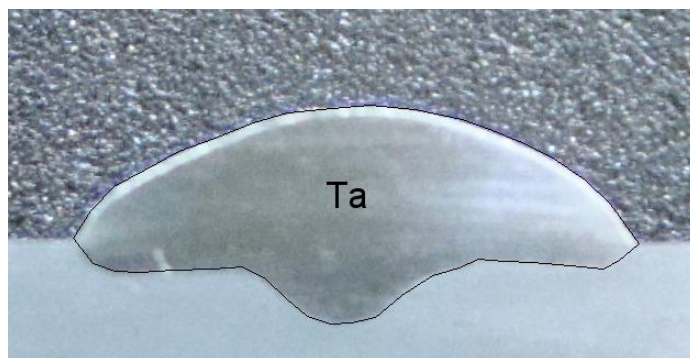
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 - Área de Penetração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Área Total.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Análise do sistema de medição

De acordo com o sexto passo da metodologia, serão feitos três tipos de análises estatísticas do sistema de medição pelo GR&R, sendo: (1) GR&R cruzado, (2) GR&R expandido sem interação e (3) GR&R expandido com interações. Após isso, os resultados obtidos serão comparados.

4.2.1. Estudo de GR&R cruzado

Para o primeiro caso, o modelo de Análise de Variância segue conforme a Eq. (2). Foram considerados dois fatores aleatórios principais: peças e operadores. Também a interação entre estes. Para as análises dos cenários com fator de resposta bidimensional, Área de Penetração (Pa) e Área Total (Ta) existe uma peculiaridade para a análise no fator operador. Isto porque, considerou-se como sendo 6 operadores diferentes. Ou seja, cada um dos três operadores utilizando uma ferramenta diferente é considerado um operador diferente. Estes, em gráficos posteriores, serão representados por “11, 12, 21, 22, 31, 32”. Em que o primeiro número simboliza o número do operador, e o segundo o número da ferramenta. Por exemplo, o operador “11” é o operador 1 utilizando a ferramenta 1.

4.2.1.1. Características Críticas da Qualidade Unidimensionais

Serão feitas análises de três Características Críticas da Qualidade (CTQ) unidimensionais: (1) Reforço, (2) Penetração e (3) Largura do cordão. A análise consiste na classificação segundo o índice %R&R, ilustrado na Fig. 1 do sistema de medição e dos erros de medição.

Pra a CTQ Reforço (R), pode-se observar que o erro de medição totaliza 4,10%, caracteriza-se como um sistema marginal, ou seja, possui potencial de melhoria. Os erros de repetitividade (1,71%) e de reprodutividade (2,39%) são classificados também como marginais. Os componentes do erro de reprodutividade, média geral dos operadores e interação entre

operador e peça, com 1,13% e 1,26, respectivamente, são marginais. Resultados estes que são ilustrados na Tab. 1.

Tabela 1 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Reforço (R).

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,007317	4,10
Repetitividade	0,003056	1,71
Reprodutividade	0,004261	2,39
Operadores	0,002017	1,13
Operadores*Peças	0,002244	1,26
Variação do processo de fabricação	0,171170	95,90
Variação Total	0,178487	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Referente ao CTQ Penetração (P), o índice de classificação do sistema de medição é classificado como marginal (9,00%). Os erros de repetitividade e reprodutividade também são considerados marginais, com índices de 1,71% e 2,39%, respectivamente. Os erros referentes a reprodutividade, média geral de operadores (1,13%) e interação operador e peça (1,26%) são classificados como marginal. Tais resultados seguem na Tab. 2.

Tabela 2 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Penetração (P)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,0069420	9,00
Repetitividade	0,0044546	5,77
Reprodutividade	0,0024874	3,22
Operadores	0,0004378	0,57
Operadores*Peças	0,0020497	2,66
Variação do processo de fabricação	0,0702024	91,00
Variação Total	0,0771445	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, na largura do cordão (W), o índice %R&R é classificado como aceitável. O erro de repetitividade (0,08%), assim como, o de reprodutividade (0,65%) e seus componentes média geral dos operadores (0,31%) e interação operador e peça (0,35%), são aceitáveis. Segue na Tab.3.

Tabela 3 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Largura do cordão (W)

Parâmetro	σ^2	%Contribuição
GR&R Total	0,03507	0,73
Repetitividade	0,00368	0,08
Reprodutividade	0,03139	0,65
Operadores	0,01479	0,31
Operadores*Peças	0,01660	0,35
Variação do processo de fabricação	4,77222	99,27
Variação Total	4,80729	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais

As características críticas da qualidade bidimensionais são a área de penetração (Pa) e a área total (Ta). Serão levantados os índices %R&R do sistema de medição e também dos erros de reprodutividade e repetitividade. Por fim, dos erros da média geral dos operadores e da interação entre operador e peça, que compõe a reprodutividade.

Referente à área de penetração é possível notar, pela Tab. 1, que o erro de medição consiste em 2,36%, ou seja, o sistema é marginal. O erro devido a repetitividade resultou em 0,78%, ou seja, é aceitável. Quanto à reprodutividade, classifica-se como marginal, pois, encontrou-se 1,58%. A reprodutividade, neste caso, é dividida em dois fatores: média dos operadores utilizando determinada ferramenta (OpFerr) e na interação entre operador-ferramenta e peça (OpFerr*Peça). Observa-se que o primeiro fator tem maior contribuição na reprodutividade, com um índice de 0,93%, enquanto o segundo tem 0,65%. Assim, pode-se concluir que a variação do sistema é devido ao erro de reprodutividade. Representados na Tab. 4.

Tabela 4 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Área de Penetração (Pa)

Parâmetro	σ^2	%Contribuição
GR&R Total	0,2675	2,36
Repetitividade	0,0882	0,78
Reprodutividade	0,1793	1,58
OpFerr	0,1054	0,93
OpFerr*Peça	0,0738	0,65
Variação do processo de fabricação	11,0526	97,64
Variação Total	11,3201	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já referente à área total, o índice %R&R é classificado como aceitável com 0,62%. A repetitividade representa 0,09%, ou seja, é aceitável. O erro de reprodutividade (0,53%) e seus componentes média geral dos operadores (0,19%) e interação operador e peça (0,33%) são também aceitáveis. Apresentado na Tab. 5.

Tabela 5 - Componentes de variância no estudo de GR&R cruzado – CTQ: Área Total (Ta)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,672	0,62
Repetitividade	0,102	0,09
Reprodutividade	0,570	0,53
OpFerr	0,211	0,19
OpFerr*Peça	0,359	0,33
Variação do processo de fabricação	107,679	99,38
Variação Total	108,351	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor..

4.2.2. Estudo de GR&R expandido sem interação

No segundo cenário, o modelo utilizado é o GR&R expandido sem interação. Foram avaliados cinco fatores. Dois relacionados às medições (Operador e Ferramenta) e três à fabricação (Velocidade de alimentação do arame, Velocidade de soldagem e Tensão). O modelo da ANOVA para o GR&R expandido sem interação, está representado na Eq. (11). O fator α representa os operadores, o β as ferramentas, o τ a Tensão, o η a Velocidade de alimentação do arame, por fim, o fator ν é a Velocidade de soldagem. Neste modelo, μ é a média das medições, $\alpha_i, \beta_j, \tau_k, \eta_l, \nu_m$ são os efeitos principais dos cinco fatores, assim como, ε_{ijklmn} é o erro.

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \eta_l + \nu_m + \varepsilon_{ijklmn} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, d \\ m = 1, 2, \dots, e \\ n = 1, 2, \dots, f \end{array} \right. \quad (11)$$

4.2.2.1. Características Críticas da Qualidade Unidimensionais

Da mesma maneira que no GR&R cruzado, serão estudadas as CTQs unidimensionais: reforço (R), penetração (P) e largura do cordão (W). Serão analisadas a classificação do índice

%R&R do sistema de medição, dos erros de repetitividade e de reprodutividade, bem como, de seus componentes.

Referente a CTQ reforço, o índice %R&R é classificado como marginal com 3,31%. O erro de repetitividade (2,77%) também é considerado marginal. Porém, o erro de reprodutividade (0,53%) e seu componente média geral dos operadores (0,53%) são classificados como aceitáveis. Mostrado na Tab. 6.

Tabela 6 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Reforço (R)

Parâmetro	σ^2	%Contribuição
GR&R Total	0,010028	3,31
Repetitividade	0,008412	2,77
Reprodutividade	0,001616	0,53
Operador	0,001616	0,53
Variação do processo de fabricação	0,293209	96,69
Va	0,126271	41,64
T	0,016807	5,54
Vs	0,150132	49,51
Variação Total	0,303238	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a característica da qualidade penetração, o sistema de medição é inaceitável, pois o índice %GR&R é de 11,01%. A repetitividade também é inaceitável (10,54%). Entretanto, o erro de reprodutividade é aceitável com 0,47%. Seu componente de média geral dos operadores (0,47%) também é aceitável. Resultados ilustrados na Tab. 7.

Tabela 7 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Penetração (P)

Parâmetro	σ^2	%Contribuição
GR&R Total	0,013613	11,01
Repetitividade	0,013026	10,54
Reprodutividade	0,000586	0,47
Operador	0,000586	0,47
Variação do processo de fabricação	0,110012	88,99
Va	0,094384	76,35
T	0,011169	9,03
Vs	0,004459	3,61
Variação Total	0,123625	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema de medição da CTQ largura do cordão é classificado como marginal com 2,60%. Sendo a repetitividade (2,46%) marginal. O erro de reprodutividade é aceitável com 0,14%, assim como, sua componente média geral dos operadores (0,14%). Estes valores estão apresentados na Tab. 8.

Tabela 8 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Largura do cordão (W)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,21358	2,60
Repetitividade	0,20223	2,46
Reprodutividade	0,01134	0,14
Operador	0,01134	0,14
Variação do processo de fabricação	7,99988	97,40
Va	1,71567	20,89
T	0,99711	12,14
Vs	5,28710	64,37
Variação Total	8,21346	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais

As CTQs bidimensionais são a Área de Penetração (Pa) e a Área Total (Ta), delas serão analisadas o índice %R&R e a classificação dos erros de repetitividade e reprodutividade e seus componentes.

Referente a CTQ Área de Penetração, a contribuição do erro de medição é de 9,43%. A partir da Fig. 1, o sistema é considerado inaceitável. A repetitividade possui 8,89% de contribuição, sendo marginal. Por fim, a reprodutividade com 0,54% é aceitável, sendo deste, 0,53% referentes ao operador e 0,01% à ferramenta, resultados expostos na Tab. 9.

Já em relação a CTQ área total, o sistema de medição é classificado como marginal, com 3,55%. O erro de repetitividade (3,43%) é marginal também. Mas, o erro de reprodutividade (0,12%) é aceitável, assim como, seus componentes média geral dos operadores (0,11%) e média geral por ferramenta (0,00%). Resultados ilustrados na Tab. 10.

Tabela 9 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Área de Penetração (Pa)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	1,7171	9,43
Repetitividade	1,6186	8,89
Reprodutividade	0,0985	0,54
Operador	0,0958	0,53
Ferramenta	0,0027	0,01
Variação do processo de fabricação	16,4933	90,57
Va	8,6432	47,46
T	4,346	23,87
Vs	3,5041	19,24
Variação Total	18,2104	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido sem interação – CTQ: Área Total (Ta)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	6,507	3,55
Repetitividade	6,293	3,43
Reprodutividade	0,213	0,12
Operador	0,209	0,11
Ferramenta	0,004	0,00
Variação do processo de fabricação	177,033	96,45
Va	71,812	39,13
T	7,943	4,33
Vs	97,278	53,00
Variação Total	183,540	100

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2.3. Estudo de GR&R expandido com interação

Serão acrescentadas interações ao modelo do GR&R Expandido. Assim, como exposto na Eq. (12), $(\alpha\beta)_{ij}$ é a interação de segunda ordem entre os fatores de medição, $(\tau\eta)_{kl}, (\tau\nu)_{km}, (\eta\nu)_{lm}$ são as interações de segunda ordem entre os fatores de fabricação e $(\tau\eta\nu)_{klm}$ é a interação de terceira ordem entre os fatores de fabricação. Vale salientar que para este estudo, não se fez relevante a interação entre os fatores de fabricação e os de medição.

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \tau_k + \eta_l + \nu_m + (\alpha\beta)_{ij} + (\tau\eta)_{kl} + (\tau\nu)_{km} + (\eta\nu)_{lm} + (\tau\eta\nu)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, d \\ m = 1, 2, \dots, e \\ n = 1, 2, \dots, f \end{array} \right. \quad (12)$$

4.2.3.1. Características Críticas da Qualidade Unidimensionais

Nesta seção serão analisados as CTQs unidimensionais, Reforço (R), Penetração (P) e Largura do cordão (W) a partir do GR&R expandido com interações.

O sistema de medição é classificado como marginal com 2,08%, em relação ao CTQ Reforço (R). O erro de repetitividade também é marginal, com 1,54%. Já o erro de reprodutividade e seu componente média geral dos operadores, ambos com 0,54%, é classificado como aceitável. Estas classificações podem ser observadas na Tab. 11.

Tabela 11 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Reforço (R)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,006234	2,08
Repetitividade	0,004618	1,54
Reprodutividade	0,001616	0,54
Operador	0,001616	0,54
Variação do processo de fabricação	0,293526	97,92
Va	0,119520	39,84
T	0,015294	5,10
Vs	0,144899	48,34
Va*T	0,003238	1,08
Va*Vs	0,010675	3,56
Variação Total	0,299760	100,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Já na CTQ penetração, o sistema de medição é classificado como marginal. A repetitividade também é marginal com 4,86%. Todavia, a reprodutividade (0,50%) e a média geral dos operadores (0,50%) são classificadas como aceitáveis. Resultados expostos na Tab. 12.

Tabela 12 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Penetração (P)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,006344	5,36
Repetitividade	0,005758	4,86
Reprodutividade	0,000586	0,50
Operador	0,000586	0,50
Variação do processo de fabricação	0,112105	94,64
Va	0,083200	70,24
T	0,002254	1,90
Vs	0,000000	0,00
Va*T	0,014355	12,12
Va*Vs	0,008417	7,11
T*Vs	0,003880	3,28
Variação Total	0,118449	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o índice %GR&R da CTQ largura do cordão (W) é aceitável com 0,33%. Os erros repetitividade (0,19%) e reprodutividade (0,14%), bem como, a média geral dos operadores (0,14%), são classificados como aceitáveis. Estas informações são apresentadas na Tab. 13.

Tabela 13 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Largura do cordão (W)

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,02629	0,33
Repetitividade	0,01494	0,19
Reprodutividade	0,01134	0,14
Operador	0,01134	0,14
Variação do processo de fabricação	8,01549	99,67
Va	1,48716	18,49
T	0,70192	8,73
Vs	5,13968	63,91
Va*T	0,38147	4,74
Va*Vs	0,08595	1,07
T*Vs	0,21931	2,73
Variação Total	8,04177	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.2. Características Críticas da Qualidade Bidimensionais

De acordo com a Tab. 14, o erro de medição da resposta área de penetração é de 1,42%. Logo, o sistema como marginal. O erro referente à repetitividade é de 0,85%. O de reprodutividade é de 0,57%, sendo este dividido entre o fator operador (0,56%) e ferramenta (0,02%). Assim, todos os erros são classificados como aceitáveis. E a interação entre ferramenta e operador não foi relevante para a análise pois seu *p-value* foi menor que 0,05 na ANOVA.

Tabela 14 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Área de Penetração

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,2438	1,42
Repetitividade	0,1453	0,85
Reprodutividade	0,0985	0,57
Operador	0,0958	0,56
Ferramenta	0,0027	0,02
Variação do processo de fabricação	16,9164	98,58
Va	7,2865	42,46
T	2,6852	15,65
Vs	2,785	16,23
Va*T	1,9572	11,41
Va*Vs	0,0736	0,43
T*Vs	0,682	3,97
Va*T*Vs	1,447	8,43
Variação Total	17,1603	100

Fonte: Elaborado pelos autores.

Referente à CTQ Área Total, o sistema de medição é classificado como aceitável com 0,33%. Os erros de repetitividade (0,21%), erro de reprodutividade (0,12%), média geral dos operadores (0,12%) e a média geral das ferramentas (0,00%) são aceitáveis. Resultados expostos na Tab. 15.

Tabela 15 - Componentes de variância no estudo de GR&R expandido com interações – CTQ: Área Total

Parâmetro	σ^2	% Contribuição
GR&R Total	0,601	0,33
Repetitividade	0,388	0,21
Reprodutividade	0,213	0,12
Operador	0,209	0,12
Ferramenta	0,004	0,00
Variação do processo de fabricação	180,714	99,67
Va	67,735	37,35
T	3,254	1,79
Vs	95,526	52,68
Va*T	4,755	2,62
Va*Vs	0,000	0,00
T*Vs	0,103	0,06
Va*T*Vs	9,368	5,17
Variação Total	181,342	100,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3. Comparação das Análises

Neste tópico, serão apresentadas as comparações entre as análises dos sistemas de medição. Primeiramente, serão feitas entre o GR&R expandido sem interação com o GR&R expandido com interações. Para assim, concluir qual desses é o mais apropriado para fazer a comparação com o GR&R cruzado. Vale ressaltar que as comparações serão feitas em diferentes cenários, isto é, as CTQs apresentam diferentes resultados no sistema de medição, como mostra a tabela resumo (Tab. 16). Tal afirmação torna relevante as conclusões deste estudo.

Tabela 16 - Tabela resumo dos cenários de análise

	GR&R cruzado				
	Reforço (R)	Penetração (P)	Largura do cordão (W)	Área de Penetração (Pa)	Área Total (Ta)
GR&R Total	Marginal	Marginal	Aceitável	Marginal	Aceitável
Repetitividade	Marginal	Marginal	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Reprodutividade	Marginal	Marginal	Aceitável	Marginal	Aceitável
Operador	Marginal	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Operador*Peça	Marginal	Marginal	Aceitável	Aceitável	Aceitável
	GR&R expandido sem interação				
	Reforço (R)	Penetração (P)	Largura do cordão (W)	Área de Penetração (Pa)	Área Total (Ta)
GR&R Total	Marginal	Inaceitável	Marginal	Inaceitável	Marginal
Repetitividade	Marginal	Inaceitável	Marginal	Inaceitável	Marginal
Reprodutividade	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Operador	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Ferramenta	-	-	-	Aceitável	Aceitável
	GR&R expandido com interações				
	Reforço (R)	Penetração (P)	Largura do cordão (W)	Área de Penetração (Pa)	Área Total (Ta)
GR&R Total	Marginal	Marginal	Aceitável	Marginal	Aceitável
Repetitividade	Marginal	Marginal	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Reprodutividade	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Operador	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Ferramenta	-	-	-	Aceitável	Aceitável

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1. Comparação entre GR&R expandido com interações com GR&R expandido sem interação

Nesta seção serão comparados o GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação, em relação aos cinco cenários: com as CTQs unidimensionais, Reforço, Penetração e Largura do cordão e com as CTQs bidimensionais, a Área de Penetração e a Área Total.

4.3.1.1. Características Críticas da Qualidade unidimensionais

Na comparação entre as análises dos GR&R expandido com interações e o sem interação, as variáveis de medição e fabricação são as mesmas. Porém, pela ausência de termos não lineares, que são as interações, no modelo sem interações, há um excessivo percentual atribuído à repetitividade, o qual representa o erro do modelo, como pode ser observado na Eq. (8).

Percebe-se que ao incluir interações no modelo de análise de variância, o erro será menor. Pois, o modelo é mais completo e o erro acumulado no estudo sem interação irá para as

variáveis do processo de fabricação. Além disso, pode ser observado que em todos os cenários, o índice %GR&R no expandido com interações possui valores menores do que no expandido sem interações, como ilustrado nas Tab. 17, Tab.18 e Tab. 19.

Tabela 17 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Reforço (R)

GR&R expandido com interações		GR&R expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	2,08	GR&R Total	3,31
Repetitividade	1,54	Repetitividade	2,77
Reprodutividade	0,54	Reprodutividade	0,53
Operador	0,54	Operador	0,53
Variação do processo de fabricação	97,92	Variação do processo de fabricação	96,69
Va	39,84	Va	41,64
T	5,10	T	5,54
Vs	48,34	Vs	49,51
Va*T	1,08		
Va*Vs	3,56		
Variação Total	100	Variação Total	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Penetração (P)

GR&R expandido com interações		GR&R expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	5,36	GR&R Total	11,01
Repetitividade	4,86	Repetitividade	10,54
Reprodutividade	0,50	Reprodutividade	0,47
Operador	0,50	Operador	0,47
Variação do processo de fabricação	94,64	Variação do processo de fabricação	88,99
Va	70,24	Va	76,35
T	1,90	T	9,03
Vs	0,00	Vs	3,61
Va*T	12,12		
Va*Vs	7,11		

T*Vs	3,28		
Variação Total	100,00	Variação Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação – CTQ: Largura do cordão (W)

GR&R expandido com interações		GR&R expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	0,33	GR&R Total	2,60
Repetitividade	0,19	Repetitividade	2,46
Reprodutividade	0,14	Reprodutividade	0,14
Operador	0,14	Operador	0,14
Variação do processo de fabricação	99,67	Variação do processo de fabricação	97,40
Va	18,49	Va	20,89
T	8,73	T	12,14
Vs	63,91	Vs	64,37
Va*T	4,74		
Va*Vs	1,07		
T*Vs	2,73		
Variação Total	100,00	Variação Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1.2. Características Críticas da Qualidade bidimensionais

Análogo a comparação das CTQs unidimensionais, nos bidimensionais, as variáveis também são as mesmas e o que difere são as inclusões das interações. Além disso, é adicionado nestes casos um componente do erro da reprodutividade, que é a média geral das ferramentas.

Pode-se constatar que o modelo mais completo é o com interações. No sem interação o índice %R&R é sempre maior, pois a falta das interações acumula percentual no erro da repetitividade. Na CTQ área de penetração o sistema de medição passa de marginal no GR&R com interações para inaceitável no GR&R sem interação. Na CTQ Área Total, o índice %R&R é classificado como aceitável no caso do GR&R com interações e marginal no sem interações. Vale salientar que a interação Operador*Ferramenta não foi classificado, porque sua variância não é significativa a partir da ANOVA. Os resultados podem ser observados nas Tab. 20 e Tab. 21.

Tabela 20 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação - CTQ: Área de Penetração (Pa)

GR&R expandido com interações		GR&R expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	1,42	GR&R Total	9,43
Repetitividade	0,85	Repetitividade	8,89
Reprodutividade	0,57	Reprodutividade	0,54
Operador	0,56	Operador	0,53
Ferramenta	0,02	Ferramenta	0,01
Variação do processo de fabricação	98,58	Variação do processo de fabricação	90,57
Va	42,46	Va	47,46
T	15,65	T	23,87
Vs	16,23	Vs	19,24
Va*T	11,41		
Va*Vs	0,43		
T*Vs	3,97		
Va*T*Vs	8,43		
Variação Total	100	Variação Total	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R expandido sem interação - CTQ: Área Total (Ta)

GR&R expandido com interações		GR&R expandido sem interação	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	0,33	GR&R Total	3,55
Repetitividade	0,21	Repetitividade	3,43
Reprodutividade	0,12	Reprodutividade	0,12
Operador	0,12	Operador	0,11
Ferramenta	0,00	Ferramenta	0,00
Variação do processo de fabricação	99,67	Variação do processo de fabricação	96,45
Va	37,35	Va	39,13
T	1,79	T	4,33
Vs	52,68	Vs	53,00
Va*T	2,62		
Va*Vs	0,00		
T*Vs	0,06		

Va*T*Vs	5,17		
Variação Total	100,00	Variação Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2. Comparação entre GR&R expandido com interações com GR&R cruzado

Na seção 4.3.1, foi constatado que o GR&R expandido com interações apresentou melhores resultados do que o GR&R expandido sem interação, assim nesta seção serão comparados os resultados do GR&R expandido com interações com os do Cruzado, tanto das CTQs unidimensionais, quanto das bidimensionais.

4.3.2.1. Características Críticas da Qualidade unidimensionais

Pode-se perceber que no expandido com interações existe uma descrição mais detalhada daquilo que compõe as contribuições referentes as medições (GR&R Total) e ao processo de fabricação (Variação do processo de fabricação). Isso não ocorre no GR&R cruzado. É possível observar qual das variáveis de controle influenciam mais na variabilidade do processo, tanto em relação aos efeitos principais, quanto às interações. Por exemplo, na Tab. 22, vê-se que em relação a CTQ Reforço a variável de fabricação Vs é a que mais influencia na variabilidade do processo. Já para a CTQ Penetração, na Tab. 23, é o Va . Enquanto que no tocante a CTQ Largura do cordão, na Tab. 24 é o Vs.

Tabela 22 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Reforço (R)

GR&R expandido com interações		GR&R cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	2,08	GR&R Total	4,10
Repetitividade	1,54	Repetitividade	1,71
Reprodutividade	0,54	Reprodutividade	2,39
Operador	0,54	Operador	1,13
		Operador*Peça	1,26
Variação do processo de fabricação	97,92	Variação do processo de fabricação	95,90
Va	39,84		
T	5,10		
Vs	48,34		
Va*T	1,08		
Va*Vs	3,56		

Variação Total	100,00	Variação Total	100,00
----------------	--------	----------------	--------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Penetração (P)

GR&R expandido com interações		GR&R cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	5,36	GR&R Total	4,10
Repetitividade	4,86	Repetitividade	1,71
Reprodutividade	0,50	Reprodutividade	2,39
Operador	0,50	Operador	1,13
		Operador*Peça	1,26
Varição do processo de fabricação	94,64	Varição do processo de fabricação	95,90
Va	70,24		
T	1,90		
Vs	0,00		
Va*T	12,12		
Va*Vs	7,11		
T*Vs	3,28		
Varição Total	100,00	Varição Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Largura do cordão (W)

GR&R expandido com interações		GR&R cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	0,33	GR&R Total	0,73
Repetitividade	0,19	Repetitividade	0,08
Reprodutividade	0,14	Reprodutividade	0,65
Operador	0,14	Operador	0,31
		Operador*Peça	0,35
Varição do processo de fabricação	99,67	Varição do processo de fabricação	99,27
Va	18,49		
T	8,73		
Vs	63,91		

Va*T	4,74		
Va*Vs	1,07		
T*Vs	2,73		
Variação Total	100,00	Variação Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2.2. Características Críticas da Qualidade bidimensionais

Na análise expandida das CTQs bidimensionais existem as variáveis operador e ferramenta como fatores independentes de medição, além das interações destes. Não é possível perceber isso no cruzado, pois só é permitido incluir um fator independente de medição. De forma análoga, a variação do processo de fabricação possui três fatores e suas interações no GR&R expandido, já no cruzado a contribuição é apenas da variável peça, isto pode ser observado na Tab. 25 e 26.

Tabela 25 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Área de Penetração (Pa)

GR&R expandido com interações		GR&R cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	1,42	GR&R Total	2,36
Repetitividade	0,85	Repetitividade	0,78
Reprodutividade	0,57	Reprodutividade	1,58
Operador	0,56	OpFerr	0,93
Ferramenta	0,02	OpFerr*Peça	0,65
Variação do processo de fabricação	98,58	Variação do processo de fabricação	97,64
Va	42,46		
T	15,65		
Vs	16,23		
Va*T	11,41		
Va*Vs	0,43		
T*Vs	3,97		
Va*T*Vs	8,43		
Variação Total	100	Variação Total	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 - Comparação entre a componentes de variação do GR&R expandido com interações e o GR&R cruzado – CTQ: Área Total (Ta)

GR&R expandido com interações		GR&R cruzado	
Parâmetro	% Contribuição	Parâmetro	% Contribuição
GR&R Total	0,33	GR&R Total	0,62
Repetitividade	0,21	Repetitividade	0,09
Reprodutividade	0,12	Reprodutividade	0,53
Operador	0,12	OpFerr	0,19
Ferramenta	0,00	OpFerr*Peça	0,33
Variação do processo de fabricação	99,67	Variação do processo de fabricação	99,38
Va*T	2,62		
Va*Vs	0,00		
T*Vs	0,06		
Va*T*Vs	5,17		
Variação Total	100,00	Variação Total	100,00

Fonte: Elaborado pelos autor.

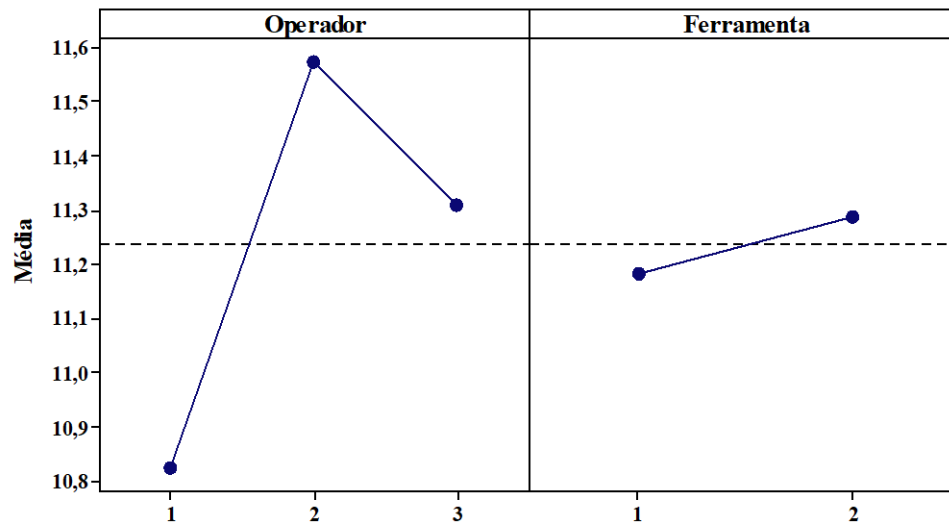
4.4. Análises Gráficas

Os gráficos a serem analisados a seguir são apenas da área de Penetração (Pa), por ser a resposta que apresenta todos os tipos de erro de medição significativos. As análises gráficas do GR&R expandido com e sem interações são as mesmas. Para a reprodutividade, tem-se o gráfico de efeito principal (Fig. 6). Nele são dadas as médias gerais de cada operador e de cada ferramenta relacionados com a resposta. Observa-se que a média geral do operador 1 é menor que a dos outros dois. Enquanto que a diferença entre a média das ferramentas é mínima, ou seja, não há influência no uso de ambas.

Na análise da reprodutividade pelo GR&R cruzado obteve-se dois diferentes gráficos. O primeiro refere-se ao gráfico das médias (Fig. 7). Nota-se que a média geral do operador 1 com as ferramentas 1 e 2, estão mais distantes das dos demais operadores. E que o tipo de ferramenta não influencia na diferença das médias.

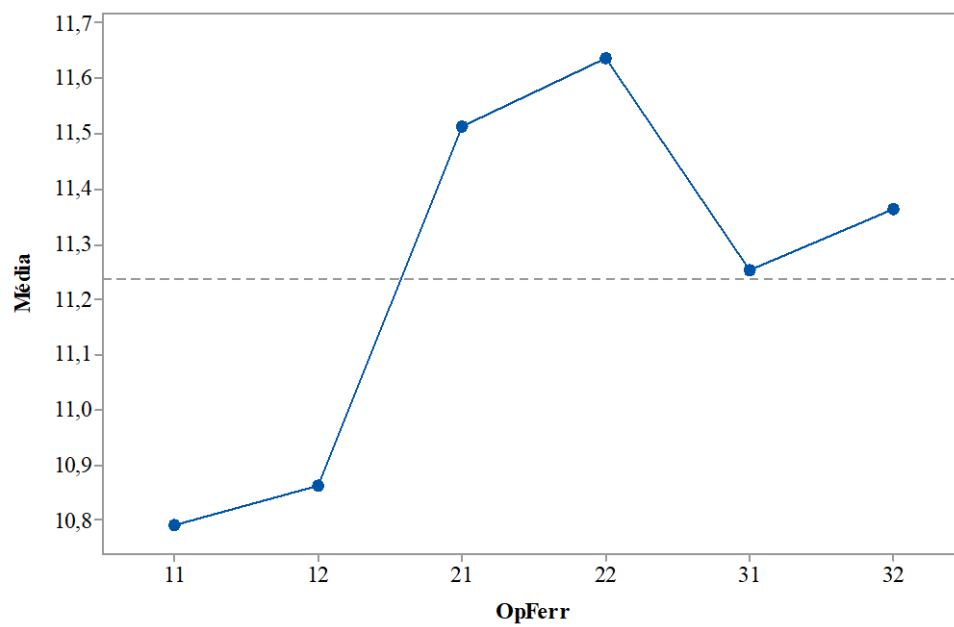
O segundo (Fig. 8) é o gráfico de interação OpFerr*Peça, nele estão expostas as médias das medições dos operadores, por peça. Pode-se observar, por exemplo, que na peça 6 as medições do operador 1 com ambas as ferramentas, diferiu-se dos demais.

Figura 6 - Médias dos efeitos principais



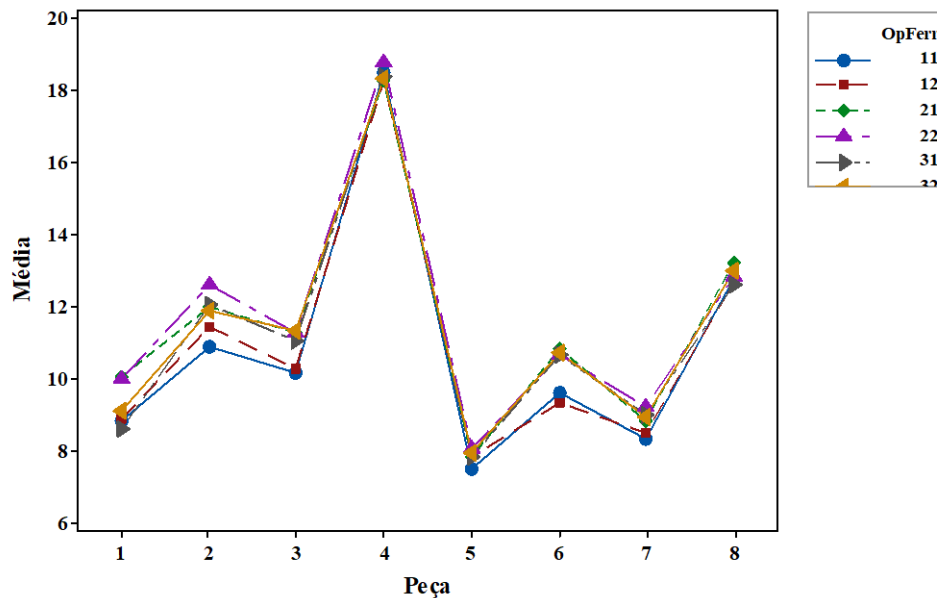
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 - Médias Geral dos Operadores por Ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor.

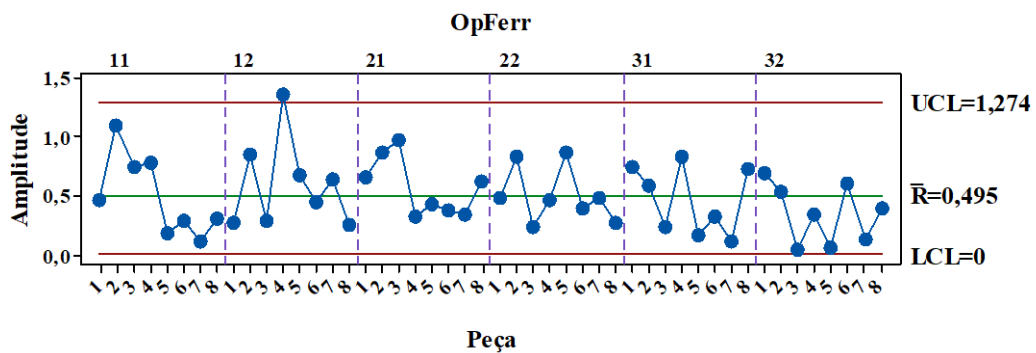
Figura 8 - Gráfico de Interação entre Operador e Peça



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para análise da repetitividade, nos 3 cenários, o *Rchart*, que é o gráfico que avalia o este erro tanto no GR&R cruzado quanto no GR&R expandido, apresentou o mesmo resultado (Figura 9). Ele representa a amplitude das medições de cada operador com cada ferramenta. Nota-se que o operador 1 utilizando a ferramenta 2, teve uma amplitude acima do limite superior aceitável ($UCL = 1,274$).

Figura 9 - *RChart* em análise expandida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, tanto as análises estatísticas quanto os resultados gráficos indicam que o GR&R expandido é estudo mais completo e eficiente na análise do erro de medição, proporcionando análises do efeito principal e das interações para as variáveis de processo e de medição.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi comparar índices de classificação de sistemas de medição a partir dos estudos de GR&R cruzado, GR&R expandido sem interação e GR&R expandido com interações. Para isso, foram analisados dados experimentais de um processo de soldagem de revestimento, a partir de cinco cenários distintos. Sendo, três CTQs unidimensionais: o Reforço, a Penetração e a Largura do cordão; e duas bidimensionais: a Área de Penetração e a Área Total.

Finalizando a metodologia com seu último passo. É possível afirmar que o melhor arranjo experimental para o presente experimento é o GR&R expandido com interações. Pois, quando comparado ao expandido sem interação, ele é mais eficiente por incluir fatores não lineares e diminuir o erro acumulado do modelo de Análise de Variância. Já em relação ao cruzado, o expandido com interações avalia a influência do sistema de medição na variabilidade do processo com mais fatores tanto no tocante das variáveis de medição quanto nas de processo. Além disso, os gráficos do expandido são mais completos. Isso, porquê apresenta informações sobre as variáveis de processo e de medição, bem como, suas interações em relação aos gráficos do GR&R cruzado.

Afirmar que o GR&R expandido é o estudo mais adequado para a análise do sistema de medição proporciona não só uma possibilidade de acrescentar fatores de medição ou de processo, como ocorreu nos estudos de Awad *et al.* (2009) e Senol (2004), como assegura a estudos de qualidade uma ferramenta mais completa para assegurar a influência do erro de medição em uma análise de qualidade de um processo de fabricação.

Nos casos expostos o GR&R expandido possuía o índice do erro de medição (GR&R Total) menor do que o GR&R Cruzado, concluindo que quando é inserido as interações e mais componentes de medição e de processo, o estudo analisa de forma mais apurada a variação de fabricação e traz resultados mais confiáveis.

Finalmente, sugere-se para futuros estudos, fazer a comparação destes cenários em outros processos de fabricação, bem como, em situações multivariadas.

Apêndice**Tabela A1 – Medições CTQs Unidimensionais**

Peças	Operador	Réplica	Va	T	Vs	R	P	W
1	1	1	7	27	30	2,563	1,515	11,341
1	2	1	7	27	30	2,636	1,717	11,702
1	3	1	7	27	30	2,783	1,529	11,642
2	1	1	10	27	30	3,137	1,913	12,968
2	2	1	10	27	30	3,233	2,065	13,245
2	3	1	10	27	30	3,040	2,001	13,008
3	1	1	7	32	30	2,512	1,640	12,665
3	2	1	7	32	30	2,583	1,686	13,059
3	3	1	7	32	30	2,512	1,675	12,770
4	1	1	10	32	30	3,175	2,140	15,625
4	2	1	10	32	30	2,961	2,140	15,664
4	3	1	10	32	30	2,803	2,519	15,573
5	1	1	7	27	50	2,047	1,596	9,057
5	2	1	7	27	50	2,069	1,712	9,240
5	3	1	7	27	50	1,967	1,657	8,938
6	1	1	10	27	50	2,563	1,836	9,678
6	2	1	10	27	50	2,831	1,861	10,155
6	3	1	10	27	50	2,818	1,984	10,279
7	1	1	7	32	50	1,860	1,539	9,301
7	2	1	7	32	50	1,951	1,488	9,460
7	3	1	7	32	50	1,964	1,604	9,558
8	1	1	10	32	50	2,432	2,060	11,653
8	2	1	10	32	50	2,506	2,025	11,739
8	3	1	10	32	50	2,419	2,083	11,457
1	1	2	7	27	30	2,602	1,631	11,302
1	2	2	7	27	30	2,836	1,518	11,901
1	3	2	7	27	30	2,705	1,568	11,642
2	1	2	10	27	30	3,175	1,913	13,044
2	2	2	10	27	30	3,194	1,909	13,362
2	3	2	10	27	30	3,040	2,001	13,085
3	1	2	7	32	30	2,512	1,640	12,770
3	2	2	7	32	30	2,619	1,686	13,059
3	3	2	7	32	30	2,547	1,675	12,840
4	1	2	10	32	30	2,818	2,533	15,768
4	2	2	10	32	30	2,925	2,176	15,628
4	3	2	10	32	30	2,873	2,306	15,573
5	1	2	7	27	50	2,013	1,561	9,057
5	2	2	7	27	50	2,140	1,641	9,311
5	3	2	7	27	50	2,036	1,587	8,973
6	1	2	10	27	50	2,563	1,798	9,831
6	2	2	10	27	50	2,831	1,780	10,277

6	3	2	10	27	50	2,738	1,826	10,160
7	1	2	7	32	50	1,860	1,539	9,236
7	2	2	7	32	50	1,984	1,587	9,528
7	3	2	7	32	50	1,898	1,702	9,590
8	1	2	10	32	50	2,432	1,959	11,585
8	2	2	10	32	50	2,471	2,094	11,670
8	3	2	10	32	50	2,419	2,083	11,457
1	1	3	7	27	30	2,680	1,515	11,341
1	2	3	7	27	30	2,796	1,558	11,861
1	3	3	7	27	30	2,665	1,568	11,681
2	1	3	10	27	30	3,137	1,913	12,968
2	2	3	10	27	30	3,194	2,026	13,206
2	3	3	10	27	30	3,040	2,001	13,046
3	1	3	7	32	30	2,617	1,535	12,700
3	2	3	7	32	30	2,583	1,686	12,987
3	3	3	7	32	30	2,582	1,710	12,700
4	1	3	10	32	30	2,890	2,426	15,661
4	2	3	10	32	30	2,997	2,176	15,701
4	3	3	10	32	30	2,873	2,412	15,538
5	1	3	7	27	50	2,013	1,561	8,883
5	2	3	7	27	50	2,033	1,712	9,204
5	3	3	7	27	50	2,002	1,587	9,076
6	1	3	10	27	50	2,601	1,836	9,755
6	2	3	10	27	50	2,831	1,820	10,074
6	3	3	10	27	50	2,738	1,905	10,279
7	1	3	7	32	50	1,828	1,636	9,172
7	2	3	7	32	50	1,951	1,621	9,528
7	3	3	7	32	50	1,964	1,637	9,590
8	1	3	10	32	50	2,432	2,027	11,653
8	2	3	10	32	50	2,506	2,094	11,705
8	3	3	10	32	50	2,385	2,049	11,390

Tabela A2 – Medições CTQs Bidimensionais

Peça	Operador	Ferramenta	OpFerr	Va	T	Vs	Réplica	Pa	Ta
1	1	1	11	7	27	30	1	8,884	31,008
1	1	2	12	7	27	30	1	8,926	31,631
1	2	1	21	7	27	30	1	10,245	33,200
1	2	2	22	7	27	30	1	9,892	32,021
1	3	1	31	7	27	30	1	8,629	31,520
1	3	2	32	7	27	30	1	8,694	31,901
2	1	1	11	10	27	30	1	10,557	40,255
2	1	2	12	10	27	30	1	11,922	40,368
2	2	1	21	10	27	30	1	12,461	41,420
2	2	2	22	10	27	30	1	12,636	41,311
2	3	1	31	10	27	30	1	12,318	40,982
2	3	2	32	10	27	30	1	11,568	40,440
3	1	1	11	7	32	30	1	10,203	32,204
3	1	2	12	7	32	30	1	10,369	32,162
3	2	1	21	7	32	30	1	10,819	33,735
3	2	2	22	7	32	30	1	11,112	34,169
3	3	1	31	7	32	30	1	10,895	32,225
3	3	2	32	7	32	30	1	11,277	32,406
4	1	1	11	10	32	30	1	18,311	52,876
4	1	2	12	10	32	30	1	17,510	51,996
4	2	1	21	10	32	30	1	18,441	52,259
4	2	2	22	10	32	30	1	19,033	51,279
4	3	1	31	10	32	30	1	18,631	52,403
4	3	2	32	10	32	30	1	18,261	51,192
5	1	1	11	7	27	50	1	7,526	19,680
5	1	2	12	7	27	50	1	8,146	19,580
5	2	1	21	7	27	50	1	7,531	20,823
5	2	2	22	7	27	50	1	7,547	20,080
5	3	1	31	7	27	50	1	7,849	19,437
5	3	2	32	7	27	50	1	7,911	19,542
6	1	1	11	10	27	50	1	9,395	27,349
6	1	2	12	10	27	50	1	9,071	27,697
6	2	1	21	10	27	50	1	11,025	30,178
6	2	2	22	10	27	50	1	10,648	30,531
6	3	1	31	10	27	50	1	10,763	29,639
6	3	2	32	10	27	50	1	10,610	29,209
7	1	1	11	7	32	50	1	8,234	20,163
7	1	2	12	7	32	50	1	8,505	19,799
7	2	1	21	7	32	50	1	9,029	21,121
7	2	2	22	7	32	50	1	9,127	21,145
7	3	1	31	7	32	50	1	8,968	21,089
7	3	2	32	7	32	50	1	8,817	21,036
8	1	1	11	10	32	50	1	12,922	31,702
8	1	2	12	10	32	50	1	12,614	32,008

8	2	1	21	10	32	50	1	12,824	32,221
8	2	2	22	10	32	50	1	12,831	33,014
8	3	1	31	10	32	50	1	12,933	31,337
8	3	2	32	10	32	50	1	12,721	30,478
1	1	1	11	7	27	30	2	8,540	30,897
1	1	2	12	7	27	30	2	8,950	31,408
1	2	1	21	7	27	30	2	9,594	32,468
1	2	2	22	7	27	30	2	10,211	32,952
1	3	1	31	7	27	30	2	8,160	31,779
1	3	2	32	7	27	30	2	9,133	31,608
2	1	1	11	10	27	30	2	10,449	39,794
2	1	2	12	10	27	30	2	11,085	39,426
2	2	1	21	10	27	30	2	11,896	41,603
2	2	2	22	10	27	30	2	12,115	40,932
2	3	1	31	10	27	30	2	11,975	40,414
2	3	2	32	10	27	30	2	11,862	40,494
3	1	1	11	7	32	30	2	9,757	32,353
3	1	2	12	7	32	30	2	10,301	32,276
3	2	1	21	7	32	30	2	11,137	33,634
3	2	2	22	7	32	30	2	11,354	33,611
3	3	1	31	7	32	30	2	11,135	32,429
3	3	2	32	7	32	30	2	11,252	32,299
4	1	1	11	10	32	30	2	18,167	52,386
4	1	2	12	10	32	30	2	18,856	52,582
4	2	1	21	10	32	30	2	18,113	52,360
4	2	2	22	10	32	30	2	18,658	51,277
4	3	1	31	10	32	30	2	17,857	51,897
4	3	2	32	10	32	30	2	18,165	52,095
5	1	1	11	7	27	50	2	7,529	19,743
5	1	2	12	7	27	50	2	7,665	19,812
5	2	1	21	7	27	50	2	7,881	20,271
5	2	2	22	7	27	50	2	7,998	20,314
5	3	1	31	7	27	50	2	7,709	19,560
5	3	2	32	7	27	50	2	7,853	19,556
6	1	1	11	10	27	50	2	9,689	27,235
6	1	2	12	10	27	50	2	9,511	27,263
6	2	1	21	10	27	50	2	10,653	30,349
6	2	2	22	10	27	50	2	10,833	29,650
6	3	1	31	10	27	50	2	10,741	29,182
6	3	2	32	10	27	50	2	11,031	29,487
7	1	1	11	7	32	50	2	8,256	19,965
7	1	2	12	7	32	50	2	8,136	20,375
7	2	1	21	7	32	50	2	8,696	21,213
7	2	2	22	7	32	50	2	9,433	20,449
7	3	1	31	7	32	50	2	9,042	21,265
7	3	2	32	7	32	50	2	8,950	21,090

8	1	1	11	10	32	50	2	12,670	31,707
8	1	2	12	10	32	50	2	12,774	31,871
8	2	1	21	10	32	50	2	13,242	32,835
8	2	2	22	10	32	50	2	12,931	32,617
8	3	1	31	10	32	50	2	12,646	31,110
8	3	2	32	10	32	50	2	13,060	30,447
1	1	1	11	7	27	30	3	8,996	30,697
1	1	2	12	7	27	30	3	8,675	30,757
1	2	1	21	7	27	30	3	10,218	32,890
1	2	2	22	7	27	30	3	9,738	33,709
1	3	1	31	7	27	30	3	8,893	31,620
1	3	2	32	7	27	30	3	9,377	31,702
2	1	1	11	10	27	30	3	11,537	40,338
2	1	2	12	10	27	30	3	11,203	39,740
2	2	1	21	10	27	30	3	11,599	40,804
2	2	2	22	10	27	30	3	12,946	40,189
2	3	1	31	10	27	30	3	11,727	40,696
2	3	2	32	10	27	30	3	12,099	40,110
3	1	1	11	7	32	30	3	10,492	32,296
3	1	2	12	7	32	30	3	10,091	32,484
3	2	1	21	7	32	30	3	11,790	33,812
3	2	2	22	7	32	30	3	11,195	34,190
3	3	1	31	7	32	30	3	11,016	32,151
3	3	2	32	7	32	30	3	11,289	32,561
4	1	1	11	10	32	30	3	18,939	52,400
4	1	2	12	10	32	30	3	18,390	52,943
4	2	1	21	10	32	30	3	18,284	51,923
4	2	2	22	10	32	30	3	18,565	50,053
4	3	1	31	10	32	30	3	18,690	52,028
4	3	2	32	10	32	30	3	18,506	51,263
5	1	1	11	7	27	50	3	7,340	20,107
5	1	2	12	7	27	50	3	7,473	19,729
5	2	1	21	7	27	50	3	7,950	20,602
5	2	2	22	7	27	50	3	8,415	19,684
5	3	1	31	7	27	50	3	7,871	19,269
5	3	2	32	7	27	50	3	7,885	19,254
6	1	1	11	10	27	50	3	9,589	27,435
6	1	2	12	10	27	50	3	9,222	27,519
6	2	1	21	10	27	50	3	10,677	30,085
6	2	2	22	10	27	50	3	10,435	30,771
6	3	1	31	10	27	50	3	10,448	29,350
6	3	2	32	10	27	50	3	10,423	29,600
7	1	1	11	7	32	50	3	8,345	19,990
7	1	2	12	7	32	50	3	8,768	20,163
7	2	1	21	7	32	50	3	8,700	21,330
7	2	2	22	7	32	50	3	8,949	21,241

7	3	1	31	7	32	50	3	8,930	20,908
7	3	2	32	7	32	50	3	8,889	21,079
8	1	1	11	10	32	50	3	12,612	31,925
8	1	2	12	10	32	50	3	12,526	31,424
8	2	1	21	10	32	50	3	13,448	32,585
8	2	2	22	10	32	50	3	12,667	32,393
8	3	1	31	10	32	50	3	12,212	31,186
8	3	2	32	10	32	50	3	13,106	30,711

Fonte: Elaborado pelos autores.

Referências

- AIAG. *Measurement Systems Analysis*. Fourth ed. ed. Automotive Industry Action Group, Detroit, MI, USA: [s.n.], 2010.
- AL-REFAIE, Abbas; BATA, Nour. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. *Measurement*, v. 43, p. 842–851, 2010.
- ALSHRAIDEH, Hussam *et al.* Reference Range Estimation: Accounting for Measurement System Errors. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 32, n. 3, p. 901–908, 2016.
- AQUILA, Giancarlo *et al.* Analysis of the wind average speed in different Brazilian states using the nested GR&R measurement system. *Measurement*, v. 115, n. November 2017, p. 217–222, 2018.
- AWAD, Mahmoud *et al.* A measurement system analysis approach for hard-to-repeat events. *Quality Engineering*, v. 21, n. 3, p. 300–305, 2009.
- BURDICK, Richard K.; BORROR, Connie M.; MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models*. Vol. 17 ed. SIAM: [s.n.], 2005.
- CEPOVA, Lenka *et al.* Measurement System Analyses – Gauge Repeatability and Reproducibility Methods. *Measurement Science Review*, n. 1, p. 20–27, 2018.
- DALALAH, Doraid; DIABAT, Ali. Repeatability and reproducibility in med labs: a procedure to measurement system analysis. *IET Sci. Meas. Technol.*, v. 9, n. 7, p. 826–835, 2015.
- DALALAH, Doraid; HANI, Dania Bani. A precision-to-tolerance ratio model for the assessment of measurements uncertainty. *Precision Engineering*, v. 44, p. 143–151, 2016.
- DOLEZAL, Kristynn K; BURDICK, Richard K.; BIRCH, Nancy J. Analysis of a two-factor R & R study with fixed operators. *Journal of Quality Technology*, v. 30, n. 2, p. 163–170, 1998.
- HA, C.; KIM, D.S.; PARK, S. Assessment of the Adequacy of Gauge Repeatability and Reproducibility Study Using a Monte Carlo Simulation. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, 2017.
- LI, Ming-Hsien C.; AL-REFAIE, Abbas. Improving Wooden Parts' Quality by Adopting DMAIC Procedure. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 24, n. Qual. Reliab. Engng. Int., p. 351–360, 2008.
- MARQUES, Carlos *et al.* Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 119, n. January, p. 129–141, 2018.
- MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. Eighth ed. [S.l: s.n.], 2013.
- PAN, Jeh Nan. Evaluating the gauge repeatability and reproducibility for different industries. *Quality and Quantity*, v. 40, n. 4, p. 499–518, 2006.
- PEREIRA, Robson Bruno Dutra *et al.* Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation. *Measurement*, v. 82, p. 135–144, 2016.
- PERUCHI, R.S. *et al.* Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis. *Precision Engineering*, v. 38, n. 3, p. 651–658, 2014.
- PERUCHI, Rogério Santana *et al.* A new multivariate gage R&R method for correlated

- characteristics. *International Journal of Production Economics*, v. 144, n. 1, p. 301–315, 2013.
- PERUCHI, Rogério Santana *et al.* Comparisons of multivariate GR&R methods using bootstrap confidence interval. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 38, n. 4, p. 489, 2016.
- SENOL, Sansli. Measurement system analysis using designed experiments with minimum α - β risks and n. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 36, n. 2, p. 131–141, 2004.
- SHI, Liangxing; CHEN, Wei; LU, Liang Fu. An approach for simple linear profile gauge R&R studies. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2014, 2014.
- SOWRIRAJAN, M.; KOSHY MATHEWS, P.; VIJAYAN, S. Simultaneous multi-objective optimization of stainless steel clad layer on pressure vessels using genetic algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 32, n. 6, p. 2559–2568, 2018.
- WANG, Fu-kwun; CHIEN, Tzu-wei. Computers & Industrial Engineering Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers & Industrial Engineering*, v. 58, n. 1, p. 143–150, 2010.
- WANG, Fu Kwun; CHIEN, Tzu Wei. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. *Computers and Industrial Engineering*, v. 58, n. 1, p. 143–150, 2010.
- YU, Yabin *et al.* R & R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. *Measurement*, v. 95, p. 293–296, 2017.
- ZANOBINI, Andrea *et al.* Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement*, v. 86, p. 125–132, 2016.